

©1995 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКАНСИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ ПРИ 77 К

*Х.А.Абдуллин, Б.Н.Мукашев*

Физико-технический институт Академии наук Казахстана,  
480082, Алматы, Казахстан  
(Получена 9 июня 1994 г. Принята к печати 26 июля 1994 г.)

Методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней исследованы образцы монокристаллического кремния *n*- и *p*-типа проводимости, облученные протонами (30 МэВ) и  $\alpha$ -частицами (4 МэВ) при 77 К. Облучение проводилось как при нулевом смещении на образце, так и с приложенным напряжением. В *n*-Si, выращенном методом Чохральского, наряду с известными центрами обнаружены дефекты *E1* и *E2* с энергиями  $E_c - 0.22$  эВ и  $E_c - 0.25$  эВ. Эти дефекты наблюдаются только при облучении под смещением. Отжиг дефектов *E2* вызывает рост концентрации А-центров (*V-O*). В образцах, выращенных зонной плавкой, наблюдались электронные уровни *EA1* ( $E_c - 0.15$  эВ) и *EA2* ( $E_c - 0.29$  эВ) с равными концентрациями. Оба уровня отжигаются одновременно с энергией активации отжига  $E_a = 0.28$  эВ. В *n*-Si(Ge) обнаружены аналогичные уровни *EG1* и *EG2* с энергиями  $E_c - 0.22$  эВ и  $E_c - 0.4$  эВ. Свойства дефектов типа *EA* и *EG* позволяют идентифицировать их как двухзарядные акцепторы. Полученные результаты говорят о том, что дефекты *E1*, *E2*, *EA* и *EG* имеют вакансионную природу. В качестве модели предлагается вакансия, стабилизированная примесью кислорода (*E2*), углерода (*EA*) или германия (*EG*). В *p*-Si(Ge) наблюдались уровни *H5*, по электрическим свойствам близкие к дефектам типа *V(+ + /+)*, однако особенности кинетики отжига позволили отнести центры *H5* к дефектам типа *V-Ge*. При отжиге наблюдается переход центров *H5* в новый центр *H6*. Определены параметры процессов отжига центров.

### Введение

Вакансия является единственным хорошо изученным первичным дефектом в кремнии. К настоящему времени исследована структура центров  $V^+$  и  $V^-$  [1,2], идентифицированы электронные переходы  $V(+ + /+)$  с энергией  $E_v + 0.13$  эВ [3] и  $V(2 - /-)$  с энергией  $E_c - 0.09$  эВ [4]. Также изучены дефекты, возникающие в результате миграции вакансий и их захвата примесными атомами кислорода, фосфора, бора, алюминия и др. [5-9]. В настоящей работе сообщается о новых вакансионных дефектах, обнаруженных методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) в кремнии, облученном протонами и  $\alpha$ -частицами при 77 К.

Исследовались образцы  $n$ -Si, выращенные как методом Чохральского ( $n$ -Si- $CG$ ), так и зонной плавкой ( $n$ -Si- $FZ$ ), легированные фосфором, с удельным сопротивлением 4.5–20 Ом·см. Также исследовались образцы  $n$ - и  $p$ -типа, дополнительно легированные германием до уровня  $(0.5-1.2) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  [Si(Ge)- $CG$ ]. Тыльный контакт изготовлялся напылением в вакууме Al и кратковременным отжигом при  $\approx 550^\circ\text{C}$ . Барьер Шоттки создавался напылением золота на образцы  $n$ -типа или алюминии — на образцы  $p$ -типа. Облучение образцов проводилось протонами с энергией 30 МэВ на циклотроне Института ядерной физики Национальной академии наук Республики Казахстан либо  $\alpha$ -частицами с энергией  $\approx 4$  МэВ с помощью полониевого источника. Диапазон доз составлял  $(1-10) \cdot 10^{12}$  протонов/см<sup>2</sup> или  $(1-10) \cdot 10^9 \alpha/\text{см}^2$ . Температура образцов во время и после облучения вплоть до записи спектров нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней поддерживалась при 77 К. Для обработки экспоненциального сигнала релаксации емкости и записи спектров DLTS использовались либо умножение на временной импульс в форме прямоугольного меандра с интенсивностью (+1) с момента времени 0 до  $T/2$  и (–1) — с момента  $T/2$  до  $T$ , где  $T$  — период между импульсами заполнения, либо фильтр 3-го порядка [10].

### Экспериментальные результаты

Спектры DLTS и параметры глубоких уровней после облучения протонами существенно не отличались от случая облучения  $\alpha$ -частицами. В то же время применение  $\alpha$ -частиц позволило проводить облучение как в условиях нулевого напряжения на образце, так и под напряжением смещения. Поэтому большая часть данных была получена этим методом и в дальнейшем мы будем приводить результаты для облучения  $\alpha$ -частицами.

1. *Облучение образцов  $n$ -Si- $CG$  при 77К под напряжением смещения.* Спектры DLTS образцов  $n$ -Si- $CG$  показаны на рис. 1. Сразу после облучения концентрация А-центров мала, основной является полоса  $E1$ . Она отжигается в процессе записи спектра DLTS в области 110–120 К. Даже при минимальном временном окне, когда пики DLTS регистрируются при наименьшей температуре, максимум полосы  $E1$  находится в области температуры отжига этой полосы. Поэтому глубину залегания уровня невозможно определить из спектров DLTS. В качестве приближенного значения для энергии уровня  $E1$  можно взять величину 0.22 эВ, полученную из спектров термостимулированной емкости. Уровень  $E1$  отжигается под напряжением смещения тем быстрее, чем шире импульс заполнения. При этом растет амплитуда полосы  $E2$  с энергией  $E_c - (0.25 \pm 0.03)$  эВ и с сечением захвата  $\approx 10^{-14} \text{ см}^2$ . Эта полоса также нестабильна, и ее отжиг при 120–140 К вызывает рост концентрации А-центров (рис. 1). Наблюдалась хорошая линейная зависимость между уменьшающейся концентрацией  $E2$ -центров и увеличивающейся концентрацией А-центров.

2. *Облучение образцов  $n$ -Si- $FZ$  при 77К без напряжения смещения.* В образцах  $n$ -Si- $FZ$  спектры DLTS, полученные после облучения при нулевом смещении, почти не отличаются от случая облучения под напряжением. Здесь же наблюдалась полоса, аналогичная  $E1$ , однако

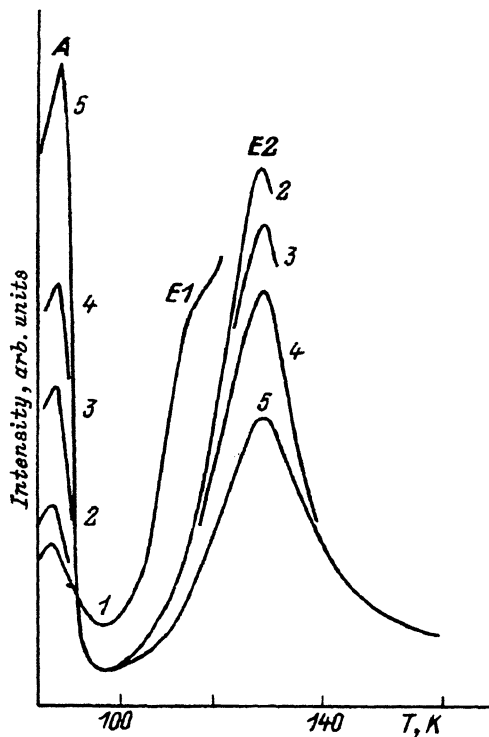


Рис. 1. Спектры DLTS образца  $n\text{-Si-CG}$  ( $\rho = 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ), облученного  $\alpha$ -частицами при 77 К, при напряжении смещения 8 В: 1 — сразу после облучения, 2-5 — последующие записи спектров при нагреве под смещением до  $\approx 140 \text{ К}$ . Для получения спектра DLTS сигнал релаксации емкости умножается на временной импульс в форме прямоугольного меандра с периодом 0.4 с, длительность импульса заполнения — 1 мкс.

ее амплитуда меньше, чем в кислородных образцах. После нагрева до 110–120 К образцов, находящихся под напряжением, наблюдается появление двух уровней (рис. 2)  $EA1$  с энергией  $E_c - 0.19 \text{ эВ}$  и  $EA2$  с энергией  $E_c - 0.29 \text{ эВ}$ , которые наряду с  $E$ -центром ( $P-V$ ) являются основными в  $n\text{-Si-FZ}$ .

Обнаружено, что сечение захвата электронов на уровень  $EA1$  мало и зависит от температуры. Изучение зависимости амплитуды пика  $EA1$  от длительности импульса заполнения позволило аппроксимировать температурную зависимость сечения захвата формулой  $\sigma_1 = \sigma_0 \exp(-E_b/kT)$ , где  $\sigma_0 = 3.6 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  и  $E_b = 0.037 \text{ эВ}$ . Вследствие температурной зависимости  $\sigma_1$  реальная глубина залегания уровня  $EA1$  оказывается меньше и равна  $E_c - 0.15 \text{ эВ}$ . Заметим, что коррекция  $EA1$  за счет температурной зависимости сечения захвата вносит существенную погрешность и увеличивает ошибку определения  $EA1$ . Уровень  $EA2$  имеет сечение захвата  $\sigma_2 = 1.4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  при 135 К, которое слабо зависит от температуры.

Уровни  $EA1$  и  $EA2$  имеют равные концентрации (с точностью 10%), что хорошо видно только при ширине импульса заполнения больше 100 мкс, когда сигнал  $EA1$  насыщается и перестает зависеть от длительности импульса. Отжиг уровней  $EA1$  и  $EA2$  также происходит одновременно (рис. 2, вставка): наблюдается линейная (с максимальным отклонением 3%) зависимость амплитуд полос  $EA1$  и  $EA2$  во время отжига. Скорость отжига сильно зависит от того, производится ли отжиг под напряжением смещения на образце или при нулевом напряжении. Как видно из рис. 3, а, при отжиге под напряжением смещения амплитуда полосы  $EA1$  растет в интервале температур 77–120 К и начинает

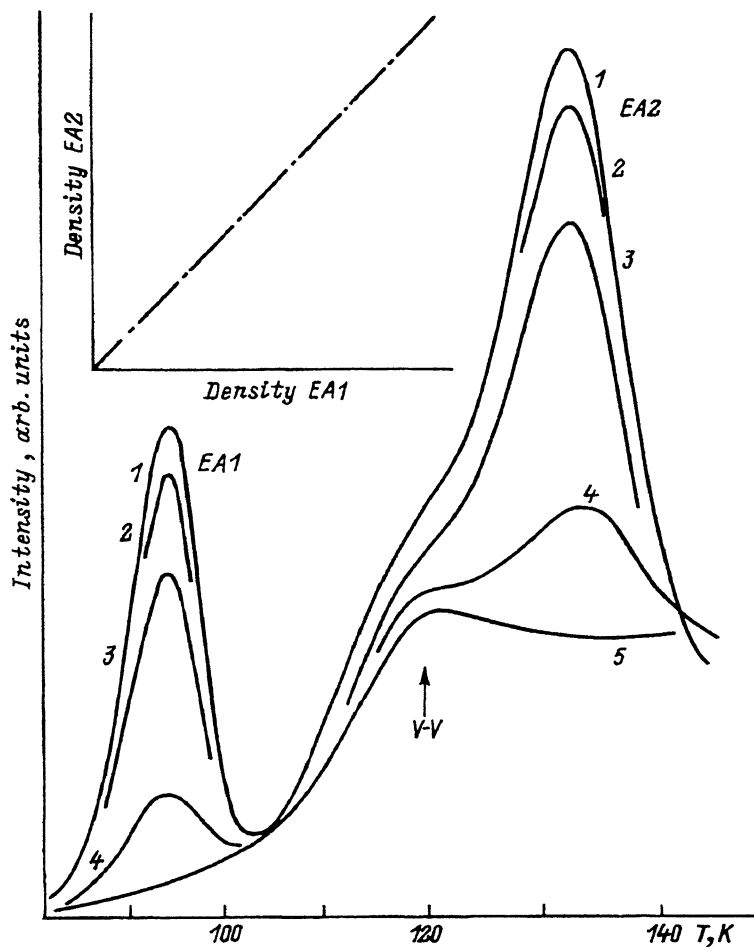


Рис. 2. Спектры DLTS образца  $n$ -Si ( $\rho = 4.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ), выращенного зонной плавкой и облученного  $\alpha$ -частицами при 77 К: 1 — под напряжением смещения, 2–5 — при нулевом напряжении. Температура отжига  $T_{\text{ann}}$ , К: 1 — 120, 2 — 107, 3 — 116, 4 — 121, 5 — 130. Время отжига — 3 мин. Форма импульса — прямоугольный меандр с периодом  $T = 0.78 \text{ с}$ , ширина импульса заполнения — 30 мкс. На вставке — изменение амплитуды полосы EA2 в зависимости от амплитуды EA1 во время отжига.

отжигаться выше  $\sim 200 \text{ К}$ . В то же время отжиг при нулевом напряжении на образце происходит при 110–125 К. Заметим, что медленное уменьшение амплитуд EA1 и EA2 при отжиге под напряжением смещения (рис. 3, а, кривые 1, 2) в области температур до 200 К связано с тем, что уже во время записи спектров DLTS часть времени (импульс заполнения) образец находится без напряжения смещения, и в это время происходит отжиг.

3. Облучение образцов  $n$ -Si-CG при 77 К без напряжения смещения. В образцах кремния  $n$ -Si-CG сразу после облучения наблюдались хорошо известные в литературе центры — А-центр ( $E_c - 0.17 \text{ эВ}$ ), Е-центр ( $E_c - 0.44 \text{ эВ}$ ) и дивакансия ( $E_c - 0.24 \text{ эВ}$ ), а также уровни EA1, EA2 и E5 с энергией  $E_c - 0.35 \text{ эВ}$  (рис. 4). Уровни E1 и E2 отсутствовали в спек-

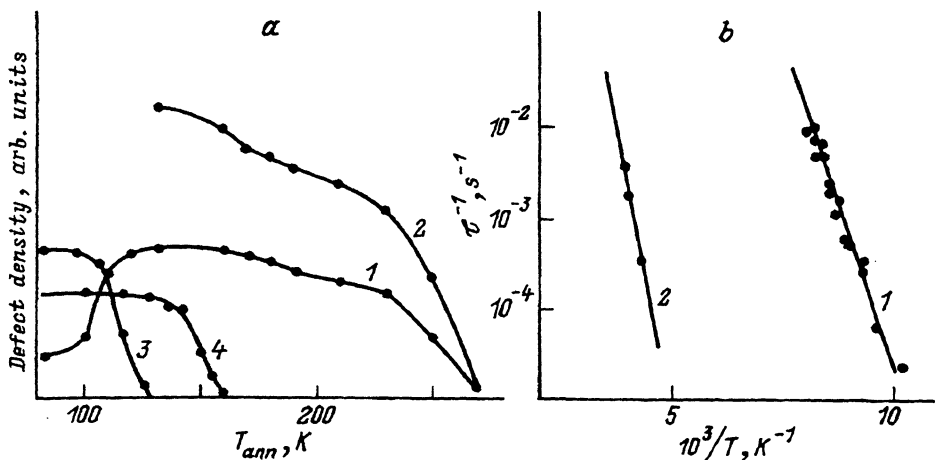


Рис. 3. Результаты по изучению влияния отжига на параметры дефектов; а — изохронный отжиг полос EA1 (1, 3), EA2 (2) и EG1 (4) под напряжением смещения (1, 2) и при нулевом смещении (3, 4) в образцах *n*-Si-FZ (1, 2, 3) и *n*-Si(Ge)-CG (4). Время отжига — 3 мин (1-3) и 5 мин (4); б — кинетика отжига уровня EA1 с энергией  $E_c = 0.15$  эВ в образцах *n*-Si-CG и *n*-Si-FZ. Данные для отжига при нулевом смещении (1) аппроксимируются кривой  $\tau^{-1} = 1.9 \cdot 10^9 \exp(-E/kT)$  с,  $E = 0.28$  эВ. 2 — отжиг под напряжением смещения.

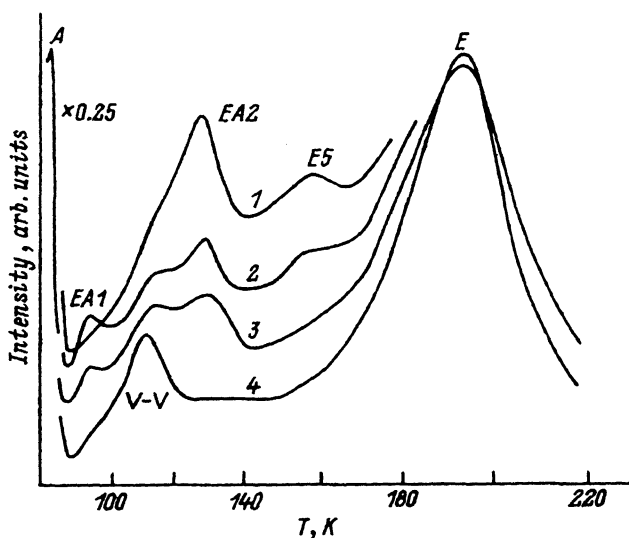


Рис. 4. Спектры DLTS образца *n*-Si-CG ( $\rho = 5$  Ом·см), облученного  $\alpha$ -частицами при 77 К без смещения: 1 — сразу после облучения, 2 — после нагрева под напряжением смещения до 180 К, 3 — 190 К, 4 — 230 К. Форма импульса — прямоугольный меандр с периодом  $T = 0.78$  с, ширина импульса заполнения — 10 мкс.

трах DLTS. Абсолютные концентрации  $EA1$  и  $EA2$  в образцах  $n$ -Si-CG и  $n$ -Si-FZ сравнимы.

Кинетику отжига в условиях нулевого смещения на образце можно описать кривой  $\tau^{-1} = 1.9 \cdot 10^9 \exp(-E/kT)$  с,  $E = 0.28$  эВ независимо от вида облучения (протоны или  $\alpha$ -частицы) и типа образцов (Si-CG или Si-FZ), как показано на рис. 3, б, кривая 1. Отжиг дефектов  $EA1$  и  $EA2$  в  $n$ -Si-FZ не сопровождается ростом других полос в спектрах DLTS (концентрация  $E$ -центров не контролировалась). В образцах  $n$ -Si-CG наблюдается увеличение концентрации  $A$ -центров на такую же величину, на какую отжигается  $EA1$ . Однако отметим, что это увеличение мало. Уровень  $E5$  с энергией  $E_c - 0.35$  эВ (рис. 4) отжигался при  $\approx 160$  К, одновременно с этим в  $n$ -Si-FZ росла концентрация межузельных атомов углерода  $C_i$  ( $E_c - 0.12$  эВ). Однако амплитуда полосы  $E5$  слишком мала для объяснения появления дефектов  $C_i$  при отжиге  $E5$ .

4. Облучение образцов Si(Ge) при 77 К. При исследовании образцов  $n$ -Si-CG обнаружено существенное отличие поведения спектров DLTS от спектров образцов  $n$ -Si-CG, легированных фосфором. Сразу после облучения при 77 К в спектрах наблюдается широкая полоса с максимумом при  $\approx 150$  К (рис 5). Эта полоса быстро отжигается уже в процессе записи спектра, и происходит постепенный рост концентрации  $A$ -центров, дивакансий, а также новых уровней  $EG1$  и  $EG2$ . Концентрации дефектов  $EG1$  и  $EG2$  очень близки друг к другу, сечение захвата электронов на уровень  $EG1$  составляет  $6 \cdot 10^{-18}$  см<sup>2</sup>, а на уровень  $EG2$  — порядка  $10^{-15}$  см<sup>2</sup>. Уровни  $EG1$  и  $EG2$  более стабильны, чем  $EA1$  и  $EA2$  (рис. 3, а). Их скорость исчезновения существенно ниже при отжиге под напряжением смещения. Однако, эти уровни имеют свойства, аналогичные  $EA1$  и  $EA2$ .

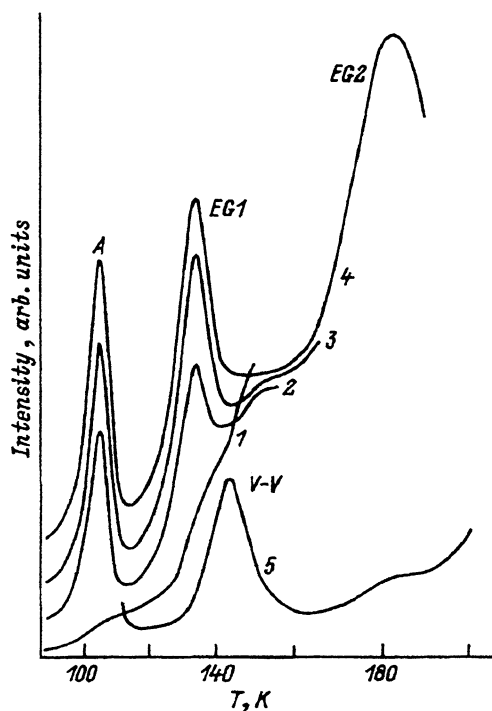


Рис. 5. Спектры DLTS образца  $n$ -Si(Ge)-CG ( $N_{Ge} = 1.2 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>), облученного  $\alpha$ -частицами при 77 К: 1 — исходный спектр, 2-5 — после отжига под напряжением смещения. Температура отжига  $T_{ann}$ , К: 2 — 150, 3 — 160, 4 — 175, 5 — 200. Фильтр 3-го порядка с временным окном 412 с<sup>-1</sup>.

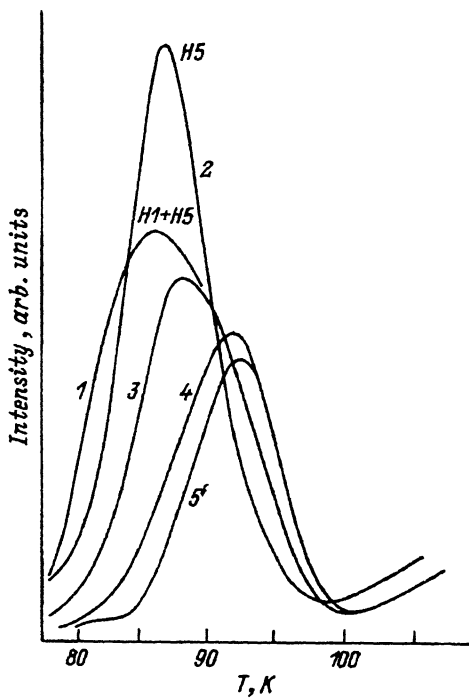


Рис. 6. Спектры DLTS образца  $p\text{-Si(Ge)-CG}$  ( $N_{\text{Ge}} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ), облученного  $\alpha$ -частицами при 77 K и отожженного без смещения в течение 5 мин при  $T_{\text{анн}}$ , K: 1 — 150, 2 — 225, 3 — 230.5, 4 — 235.5, 5 — 245.5. Фильтр 3-го порядка с временным окном  $5150 \text{ с}^{-1}$ .

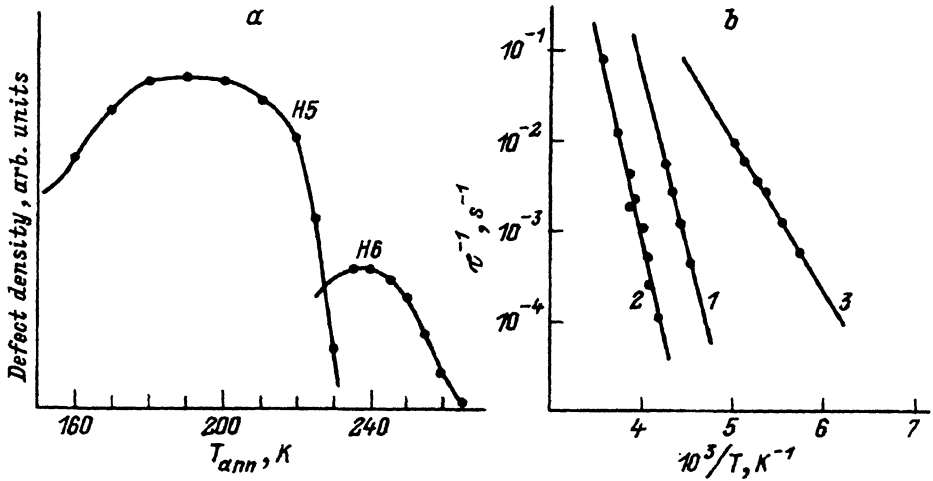


Рис. 7. Результаты по изучению влияния отжига на параметры образцов; а — изохронный отжиг (5 мин) образца  $p\text{-Si(Ge)-CG}$ , облученного  $\alpha$ -частицами при 77 K; б — кинетика отжига без напряжения смещения на образце дефектов H5 (1) и H6 (2). Также показан отжиг вакансии (H1) в  $p\text{-Si-CG}$  — кривая 3.

Исследование образцов  $p$ -Si(Ge), облученных при 77 К протонами или  $\alpha$ -частицами, показывает, что сразу после облучения в спектрах DLTS присутствуют полосы, связанные с переходами на уровни вакансий ( $H1$ ,  $E_v + 0.15$  эВ), дивакансии ( $H2$ ,  $E_v + 0.20$  эВ), междузельного углерода ( $H3$ ,  $E_v + 0.29$  эВ), а также интенсивная полоса  $H4$ ,  $E_v - 0.20$  эВ, природу которой мы обсуждали в работе [11]. Температурное положение полосы  $H1$  близко к положению полосы  $V(+/+/+)$  с энергией  $E_v + 0.13$  эВ в  $p$ -Si [2]. Величина сечения захвата на дефект типа  $H1$  также близка к значению сечения захвата на дефект  $V(+/+/+)$ . Однако форма полосы (рис. 6) свидетельствует, что она состоит из двух близких линий —  $H1$  и полосы, обозначенной  $H5$ . При отжиге без напряжения смещения в области 160–180 К полоса  $H1$  исчезает, а  $H5$  увеличивается по амплитуде (рис. 6, 7, а). Отжиг дефекта  $H5$  происходит при 210–230 К. Для процесса отжига  $H5$  получена энергия активации ( $0.69 \pm 0.06$ ) эВ и частотный фактор  $\approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$ . При отжиге  $H5$  образуется новый дефект с уровнем  $H6$  и с концентрацией примерно в 2 раза меньше, чем  $H5$ . Дефект  $H6$  отжигается с энергией активации ( $0.89 \pm 0.08$ ) эВ и частотным фактором также близким к значению  $\approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$ .

### Обсуждение результатов

Поведение спектров DLTS в облученных под напряжением смещения и без смещения образцах Si-CG сильно отличается. Это отличие, на наш взгляд, объясняется существенной разницей скорости отжига вакансий в зарядовых состояниях  $V_{\text{Si}}^-$  и  $V_{\text{Si}}^{2-}$ . Действительно, согласно данным [1], в  $n$ -Si-CG процесс отжига зарядового состояния вакансий  $V_{\text{Si}}^{2-}$  характеризуется энергией активации 0.18 эВ и частотным фактором  $4.4 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ . Это дает при 77 К время отжига примерно 2 мин. В образцах, полученных зонной плавкой, частотный фактор уменьшается до  $1.4 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$  [2]. Поэтому время отжига при 77 К будет порядка 70 мин. Таким образом, в наших опытах при характерных временах облучения 3–10 мин центры  $V_{\text{Si}}^{2-}$  в Si-CG успевают полностью отжечься с образованием А- и Е-центров. В образцах, полученных зонной плавкой, время отжига вакансий велико, поэтому спектры DLTS почти одинаковы при облучении под напряжением смещения и без напряжения.

Отсутствие А-центров после облучения под напряжением при 77 К образцов  $n$ -Si-CG свидетельствует о стабильности вакансий в зарядовом состоянии  $V_{\text{Si}}^-$ . Это согласуется с результатами [12], где была установлена стабильность отрицательного состояния вакансий до 110 К. Таким образом, спектры DLTS в интервале температур от 77 до  $\approx (110-120)$  К, записанные сразу после облучения, характерны для образцов, в которых вакансии не полностью отожглись. Свойства уровней  $E1$  и  $E2$  говорят о вакансионном характере этих дефектов, поскольку их отжиг вызывает рост концентрации А-центров.

Обратимся теперь к данным по уровням  $EA1$  и  $EA2$  в образцах  $n$ -Si. Экспериментальные результаты свидетельствуют о принадлежности уровней  $EA1$  и  $EA2$  одному и тому же дефекту. Действительно, эти уровни имеют одинаковую концентрацию и одновременно отжигаются. Глубина залегания уровня  $EA1$  примерно в 2 раза меньше, чем



$EA_2$ , что характерно для двухзарядных центров, например примесей S, Se, Te в кремнии [13]. Значение сечения захвата  $\sigma_1 \approx 10^{-17} \text{ см}^2$  типично для отталкивающего центра, а  $\sigma_2 \approx 10^{-15} \text{ см}^2$  — для нейтрального. Это позволяет предположить, что уровень  $EA_2$  соответствует переходу  $(-/0)$ , а уровень  $EA_1$  — переходу  $(2 - /-)$ . При отжиге дефектов  $EA_1$  и  $EA_2$  не наблюдается роста концентрации межузельных центров  $C_i$ , а уровень с энергией  $E_c - 0.12 \text{ эВ}$ , принадлежащий межузельному углероду, появляется при отжиге при температуре  $\approx 160 \text{ К}$ . При этой температуре уровни  $EA_1$  и  $EA_2$  в условиях отжига без напряжения уже не наблюдались, а при отжиге под напряжением смещения присутствуют вместе с центрами  $C_i$ . Поэтому они вероятнее всего не могут быть межузельными центрами. Однако отжиг дефектов  $EA_1$  и  $EA_2$  происходит одновременно с ростом концентрации А-центров в  $n\text{-Si}-CG$ . Кроме того,  $EA$ -центры появляются при  $T > 110 \text{ К}$  (рис. 3,а), т.е. одновременно с отжигом дефектов  $V_{Si}^-$ . Это позволяет заключить, что двойной акцептор  $EA$  является дефектом вакансионного типа.

Обращает внимание идентичность кинетики отжига уровня с энергией  $E_c - 0.12 \text{ эВ}$ , наблюдавшегося в [2] после облучения электронами, и уровня  $EA_1$ . Можно предположить, что это один и тот же уровень, а различие в полученных энергиях объясняется экспериментальной ошибкой и разными условиями проведения исследований. Уровни  $EA_1$  и  $E_c - 0.12 \text{ эВ}$  имеют кинетику отжига, существенно отличную от кинетики отжига вакансии в  $n\text{-Si}$  [1,2].

В образцах  $n\text{-Si}(\text{Ge})-CG$  ситуация более сложная, поскольку сразу после облучения при нулевом напряжении смещения А-центры и уровни  $EG_1$  и  $EG_2$  не наблюдаются. Это свидетельствует об эффективном захвате вакансий, подвижных при температуре облучения  $77 \text{ К}$ , на некоторые центры. Известно, что в образцах, легированных германием, образуются центры  $V\text{-Ge}$ , которые более стабильны, чем изолированные вакансии [1,14]. По-видимому, их отжигом при температуре  $\approx 150 \text{ К}$  объясняется появление А-центров и уровней  $EG_1$ ,  $EG_2$  (рис. 5). Последние имеют свойства, близкие к уровням  $EA_1$ ,  $EA_2$ : одинаковую концентрацию и одновременный отжиг, энергия уровня  $EG_1$  примерно в 2 раза меньше  $EG_2$ , а величины сечений захвата типичны для отталкивающего и нейтрального центров соответственно. Поэтому уровни  $EG_1$  и  $EG_2$  относятся к одному и тому же дефекту, а их отличие от  $EA_1$  и  $EA_2$  позволяет предположить, что примесь германия входит в состав этого дефекта.

Таким образом, обнаруженные дефекты  $E_2$ ,  $EA$  и  $EG$  проявляют ряд свойств, позволяющих отнести их к вакансионным дефектам. Во-первых, наблюдается переход  $E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow \text{А-центр}$  и частично переход  $EA \rightarrow \text{А-центр}$ . Во-вторых, дефекты  $E_2$  и  $EA$  появляются после отжига под напряжением при  $T > 110 \text{ К}$ , когда отжигается состояние  $V_{Si}^-$ , а дефекты  $EG$  появляются одновременно с А-центрами, когда идет высвобождение вакансий с центров захвата в  $\text{Si}(\text{Ge})$ . В-третьих, электронная структура дефектов  $EA$  и  $EG$  — двухзарядных акцепторов — сходна со структурой вакансии. Наконец, скорость отжига центров  $E_2$ ,  $EA$  и  $EG$ , а также уровня с энергией  $E_c - 0.12 \text{ эВ}$  [2] сильно замедляется при приложении обратного смещения. Это означает, что состояние с зарядом  $(-)$  более стабильно по сравнению с состоянием с зарядом  $(2-)$ , аналогично случаю центров  $V_{Si}^-$  и  $V_{Si}^{2-}$ , и может свидетельствовать об единой природе данного эффекта.

Вакансионная природа дефектов и их свойства позволяют предложить для них модель, в которой вакансии стабилизирована примесным атомом (или дефектом). Для дефекта  $E2$  такой примесью является кислород. По-видимому, дефект  $E2$  по своей природе сходен с ЭПР-центром  $Si-G4$  [1], имеющим близкие параметры отжига, и является вакансией, расположенной вблизи атома кислорода. Величина сечения захвата на уровень  $E2$  типична для нейтрального центра, поэтому уровню  $E2$  соответствует переход  $(-/0)$ . Уровень, относящийся к этому же центру и ответственный за переход из дважды отрицательного зарядового состояния  $(2-)$  в однозарядовое состояние  $(-)$ , должен располагаться в области  $0.1-0.12$  эВ ниже зоны дна проводимости и наблюдаться в спектрах DLTS при  $T < 77$  К.

В состав дефекта  $EA$  примесь кислорода входит не может, поскольку уровни  $EA1$  и  $EA2$  в образцах  $Si-CG$  и  $Si-FZ$  наблюдаются примерно в равных концентрациях. Наибольшую концентрацию в образцах, полученных зонной плавкой, имеет примесь углерода, поэтому она наиболее предпочтительна для объяснения формирования уровней  $EA1$  и  $EA2$ . По-видимому и другие нарушения решетки типа сжатия могут захватить вакансии, уменьшая упругую энергию. Для дефектов  $EG$ , наблюдающихся только в образцах, легированных германием до уровня  $\approx 10^{20}$  см $^{-3}$ , такими центрами могут быть атомы Ge.

Относительно природы полосы  $E1$  необходимо заметить, что она вполне может принадлежать первичному дефекту, поскольку присутствует в образцах с различными концентрациями кислорода и углерода. Кроме того,  $E1$  наблюдается до появления А-центров, т.е. до отжига вакансий. Однако трудности в определении параметров глубокого уровня  $E1$  не позволяют предложить для этого дефекта конкретную идентификацию. Предварительно можно связать  $E1$  с уровнем  $V_{Si}(-/0)$ , однако необходимы дальнейшие исследования.

Обсудим результаты для образцов  $p$ -Si(Ge). Кинетика отжига уровня  $H1$  (рис. 7,а) позволяет идентифицировать его как уровень  $V(++/+)$ . Близость энергий уровней  $H1$  и  $H5$ , переход  $H1$  в  $H5$  при отжиге и высокий частотный фактор процесса отжига  $H5$  свидетельствуют, что центр  $H5$  может быть вакансией, захваченной атомом германия. Эти центры образуются уже сразу после облучения при 77 К и увеличивают свою концентрацию после отжига при  $\approx (160-180)$  К, когда вакансии становятся подвижными. Во время отжига дефекта  $H5$  наблюдается появление новой полосы  $H6$  с амплитудой, примерно в 2 раза меньшей, чем амплитуда  $H5$ . Здесь необходимо отметить, что так как полоса  $H1$  принадлежит уровню  $V(++/+)$ , реальная концентрация этих центров в 2 раза меньше, чем определяемая из спектров DLTS. Как показано в [3], вакансия образует систему с отрицательной корреляционной энергией, и сразу после перехода  $V(+++) \rightarrow V(+) + h$  происходит переход  $V(+) \rightarrow V(0) + h$ , т.е. освобождаются две дырки. Это может быть верно и для центра  $H5$  ( $V-Ge$ ). Тогда реальная концентрация дефектов  $H5$  в 2 раза меньше, чем определяемая из спектров DLTS, и почти равна концентрации  $H6$ . В этой связи можно предположить, что дефекты  $H5$  отвечают такой конфигурации, когда вакансия еще слабо связана с атомом германия, электронная структура вакансии почти не возмущена и инверсное расположение уровней сохранено. При отжиге  $H5$  атом германия входит в первую координационную сферу вакансии

и происходит локальная перестройка в центр ( $V$ -Ge) с положительной корреляционной энергией. Другим вариантом может быть распад центра  $V$ -Ge, миграция вакансии и захват ее на другую ловушку, например на комплекс Ge-Ge, Ge-V и т.п. Для выяснения этого вопроса необходимы дальнейшие исследования.

В заключение авторы хотели бы выразить признательность Ю.В. Горелкинскому за полезные обсуждения и предоставление образцов Si(Ge).

### Список литературы

- [1] G.D. Watkins. Inst. Phys. Conf., Ser. 23, 1 (1975).
- [2] G.D. Watkins. Inst. Phys. Conf., Ser. 46, 16 (1979).
- [3] G.D. Watkins, J.R. Troxell. Phys. Rev. Lett., **44**, 593 (1980).
- [4] L.C. Kimerling, P. Blood, W.M. Gibson. Inst. Phys. Conf., Ser. 46, 273 (1979).
- [5] G. Bemski, G. Feher, E. Gere. Bull. Am. Phys. Soc., Ser. II, **3**, 135 (1958).
- [6] G.D. Watkins, J.M. Corbett. Phys. Rev., **134**, A1359 (1964).
- [7] G.D. Watkins. Phys. Rev. B, **13**, 2511 (1976).
- [8] G.D. Watkins. Phys. Rev., **155**, 802 (1967).
- [9] А.В. Двуреченский, А.А. Каранович, Б.П. Кашников. ФТП, **21**, 50 (1987).
- [10] Е.В. Чихрай, Х.А. Абдуллин. ФТП, **25**, 751 (1991).
- [11] Х.А. Абдуллин, Б.Н. Мукашев. ФТП, **28**, 1831 (1994).
- [12] B. Bech-Nielsen. *Dissertation* (University of Aarhus, 1987).
- [13] G. Grossman, K. Bergman, M. Kleverman. Physica B, **146**, 30 (1987).
- [14] A. Brelet, J. Charlemagne. Rad. Eff. Semicond., **8**, 161 (1971).

Редактор Т.А. Полянская

## A study of vacancy defects in silicon single crystals irradiated at 77 K

Kh.A. Abdullin, B.N. Mukashev

Physicotechnical Institute, 480082 Almaty, Kazakhstan

The DLTS measurements were used to study the vacancy related defects in silicon irradiated with protons or  $\alpha$ -particles. Schottky barrier structure and  $p^+$ - $n$ -junctions were bombarded at 77 K under reverse and zero biases. The known defects ( $A$ -,  $E$ -centres,  $V$ - $V$ ) and the new ones ( $E_1$ ,  $E_c - 0.22$  eV and  $E_2$ ,  $E_c - 0.25$  eV) were detected in crucible-grown  $n$ -Si. The  $E_1$  and  $E_2$  are observed only in the reverse-bias condition irradiated samples.  $E_2$  disappears at about 120 K being converted to the  $A$ -centre. In the floating zone  $n$ -Si, the  $EA_1$ ,  $E_c - 0.15$  eV and  $EA_2$ ,  $E_c - 0.29$  eV were observed in the same concentration. Both levels were annealed simultaneously and the activation energy for annealing was found to be 0.28 eV. Analogous defects  $EG_1$ ,  $E_c - 0.22$  eV and  $EG_2$ ,  $E_c - 0.4$  eV were detected in  $n$ -Si(Ge). The properties of  $EA$  and  $EG$  defects allow to identify these centres as double acceptors. Experimental results show that  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $EA$  and  $EG$  centres are vacancy related defects. Tentative models for these centers suggest that vacancies are stabilized by an oxygen atom ( $E_2$ ), a carbon atom ( $EA$ ) or a germanium atom ( $EG$ ). A new  $H5$  level has been observed in  $p$ -Si(Ge). Properties of the  $H5$  are similar to those of  $V(+ + /+)$ -level and the peculiarity of the annealing kinetics makes it possible to attribute the  $H5$  to  $V$ -Ge defect. The disappearance of the  $H5$  results in the increase of the new  $H6$ -defect concentration. The tentative models for  $H5$  and  $H6$  have been discussed.